

О.Є. Андрейків¹, І.Я. Долінська², С.В. Настасяк¹

¹Львівський національний університет імені Івана Франка

²Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

МОДЕЛЮВАННЯ РОСТУ СИСТЕМ ТРІЩИН У МЕТАЛЕВИХ ПЛАСТИНАХ ЗА ДІЇ ДОВГОТРИВАЛОГО РОЗТЯГУ І ВОДЕНЬВМІСНИХ СЕРЕДОВИЩ

Застосовуючи раніше розроблений деформаційний підхід, побудовано розрахункові моделі для визначення залишкової довговічності пластин із системами тріщин за дії довготривалого статичного навантаження і воденьвмісного середовища. Як показують експериментальні дані, воднево-механічна тріщина рухається стрибкоподібно з довжиною стрибка між максимумами величин деформацій і напружень біля вершини тріщини. Визначення цієї довжини стрибка за певний час під дією водню і механічних деформацій покладено в основу створення математичної моделі поширення воднево-механічної тріщини. Модель застосовано до визначення залишкової довговічності пластини з різними типами систем воднево-механічних тріщин: періодичною, двоякоперіодичною та періодичною системою паралельних тріщин. Встановлено залежність залишкової довговічності пластини від силового параметра навантаження, концентрації водню і геометричних параметрів систем тріщин.

Ключові слова: система воднево-механічних тріщин, математична модель, деформаційний підхід, залишкова довговічність.

O.Ye. Andreykiv, I.Ya. Dolinska, S.V. Nastasyak

SIMULATION OF THE GROWTH OF CRACK SYSTEMS IN METAL PLATES UNDER THE ACTION OF LONG-TERM STRETCHING AND HYDROGEN-CONTAINING ENVIRONMENTS

Using the previously developed deformation approach, calculation models were built to determine the residual life time of plates with crack systems under the action of a long-term static load and a hydrogen-containing environment. As experimental data show, a hydrogen-mechanical crack moves in a jump-like manner with a jump length between the maxima of deformations and stresses near the top of the crack. Determination of this jump length over a certain time under the action of hydrogen and mechanical deformations is the basis for creating a mathematical model of hydrogen-mechanical crack propagation. The model is applied to determine the residual life time of a plate with different types of hydrogen-mechanical crack systems: periodic, double-periodic, and periodic parallel crack systems. The dependence of the residual life time of the plate on the force parameter of the load, the concentration of hydrogen and the geometric parameters of the crack systems was established.

Key words: system of hydrogen-mechanical cracks, mathematical model, deformation approach, residual life time.

Постановка проблеми. Як показує експлуатаційна практика, конструкційні матеріали високої міцності під дією навантаження досить часто схильні до шкідливого впливу водню, особливо водневої крихкості [1, 2] та зародження у них тріщин [1, 3, 4]. Часто розвиток таких тріщин призводить до руйнування відповідальних елементів конструкцій. Для уникнення непередбаченого руйнування визначальною є оцінка періоду докритичного росту тріщин – залишкової довговічності елементів конструкцій. Тут слід застосовувати відповідні математичні моделі, які описують характер руйнування елементів металоконструкцій, що працюють у водневмісних середовищах за тривалих навантажень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема водневого руйнування металевих сплавів давно є в центрі уваги фізиків, матеріалознавців та інженерів-механіків [1]. У праці [5] проаналізовано вплив газоподібного водню на ріст тріщини в структурних сталях з урахуванням теплового чинника та ефектів гідрування-дегазації металів. Вивчено роль водню у поширенні тріщин за циклічних [6–9] та статичних навантажень [10]. Виявлено [6, 9] різке збільшення (на порядок) швидкості росту втомних тріщин в умовах дії газоподібного водню під високим тиском порівняно із випробуваннями на повітрі [6]. У працях [7, 8] отримано формулу для визначення швидкості поширення тріщини залежно від локальної концентрації водню у вершині тріщини, концентрації його в об'ємі металу і діапазону зміни коефіцієнта інтенсивності напружень. Запропоновано фізико-механічну модель оцінювання кінетики росту внутрішніх водневих дефектів з урахуванням нестационарних теплових інфузій [5]. Отримано [11] рівняння зміни розмірів втомної тріщини в стінці трубопроводу від часу. Застосовуючи деформаційний підхід побудовано математичні моделі визначення періоду докритичного росту воднево-механічних тріщин [1, 5]. Більшість із відомих у літературі математичних моделей [1, 4, 5, 12] для опису швидкості поширення тріщин за дії воденьвмісних середовищ описують ріст одинарних тріщин.

© О.Є. Андрейків, І.Я. Долінська, С.В. Настасяк

Однак, як показує практика [1], все-частіше елементи конструкцій піддаються зародженню і поширенню в них систем тріщин. Важливо проаналізувати вплив систем тріщин на залишкову довговічність елементів конструкцій порівняно із одною тріщиною. Розрахункові моделі цієї проблеми вивчені ще недостатньо. Саме цим питанням присвячена стаття.

Метою статті є розроблення математичної моделі для дослідження кінетики поширення систем воднево-механічних тріщин в металевих пластинах і визначення на цій основі їх залишкової довговічності.

Виклад основного матеріалу.

Математична модель росту систем воднево-механічних тріщин у пластині. Розглянемо пластину, послаблену системою n тріщин, яка перебуває під дією довготривалого статичного розтягу, що описується рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p (рис. 1) і воденьвмісного середовища. Поверхні тріщин вважаються покритими оксидною плівкою, а на ювенільних поверхнях їх рухомих вершин створюється поверхнева концентрація водню C_{H_0} . Така ситуація в подальшому зумовлює дифузію водню в зону передруйнування перед вершинами тріщин, а також зміну міцнісних та пластичних характеристик матеріалу пластини. Вважаємо, що всі тріщини приймаються в однакових умовах, а навантаження прикладене перпендикулярно до лінії їх розміщення, так що напружено-деформований стан у пластині симетричний відносно лінії розміщення тріщин. Задача полягає у визначенні часу $t = t_*$, за який внаслідок дії силового чинника і середовища одна з тріщин a_i ($i = 1, \dots, n$) досягне свого критичного розміру, що призведе до руйнування пластини. Для розв'язання задачі сформулюємо математичну модель, яка описуватиме кінетику поширення систем воднево-механічних тріщин. На основі вище сказаного, для побудови моделі розглянемо розвиток a_i -вої тріщини в j -вій вершині ($j = 1, 2$) (рис. 1).

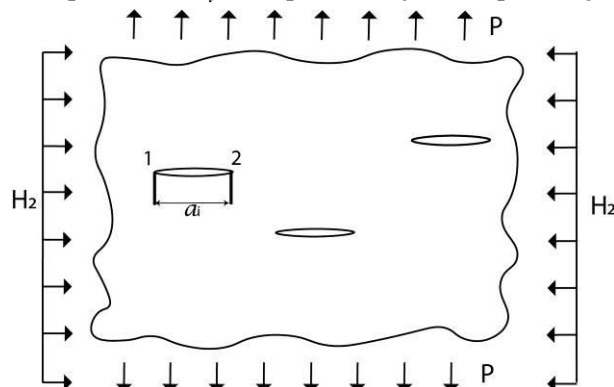


Рис. 1. Схема навантаження пластини з системою воднево-механічних тріщин.

Оскільки водневий чинник найбільше впливає на пластичні характеристики матеріалу, то для дослідження локального руйнування пластини – поширення тріщини застосуємо деформаційний підхід [1]. Раніше на основі даного підходу авторами праці [1] побудовано кінетичне рівняння для визначення швидкості поширення одинарної воднево-механічної тріщини. Беручи за основу побудову даного рівняння нижче сформульовано математичну модель для дослідження систем воднево-механічних тріщин. Враховуючи ефект Горського [1], а також результати експериментальних досліджень [1] впливу водню на деформаційні властивості металів залежність деформації $\varepsilon_{ij}(p, C_H^{ij})$ металу від параметру навантаження p і концентрації водню C_H^{ij} (малі та середні значення) запишемо у вигляді лінійної функції

$$\varepsilon_{ij}(p, C_H) = \varepsilon_{ij_0}(p) + BC_H^{ij}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{ij_0}(p)$ – деформація металу, викликана зовнішнім навантаженням; B – експериментально встановлена константа, яка залежить від типу матеріалу і температури випробувань; C_H^{ij} – концентрація водню біля j -вої вершини i -вої тріщини.

Беручи до уваги співвідношення (1) вважатимемо, що пластини перебуває в умовах дії воденьвмісних середовищ за їх малих і середніх концентрацій C_H . Для подальшого опису розвитку тріщин необхідно задати умову, яка дасть можливість за розподілом водню в зоні

передруйнування і наявною там пружно-пластичною ситуацією визначити момент елементарного акту локального руйнування. Відомо [13], що напруження і деформації в зоні передруйнування в площині тріщини вздовж лінії, перпендикулярній до її контуру, змінюються. Вони спочатку зростають на певній віддалі від контуру тріщини, де досягають своїх максимумів, а потім спадають. Встановлено [13], що максимальні деформації за розтягу в зоні передруйнування виникають на віддалі рівній розкриттю i -вої тріщини δ_{ij} від її j -вої вершини, а максимальні нормальні напруження – на віддалі $2\delta_{ij}$. З огляду на це, область максимальної концентрації водню зсувається на віддаль $2\delta_{ij}$ від вершини тріщини. Тоді можна припустити, що локальна нестійкість металу в зоні передруйнування пройде за деякий період часу t_* на певній віддалі від j -вої вершини i -вої тріщини. Враховуючи, що область максимальних концентрацій водню зсувається на віддаль $2\delta_{ij}$ від вершини тріщини, то локальна нестійкість металу пройде за час t_* на віддалі

$$x_{ij*} = 2\alpha_{ij}\delta_{ij}. \quad (2)$$

Тут α_{ij} – характеристика системи метал–середовище, вона визначається із експерименту для кожного конкретного випадку.

Воднево-механічне руйнування матеріалів – одне з видів заповільненого руйнування, за якого відбувається стрибкоподібний рух тріщини. Тобто тріщини поширюються стрибками малих розмірів за відносно великі проміжки часу – періоди підготовки стрибка. Надалі вважатимемо, що x_{ij*} – довжина елементарного стрибка i -вої тріщини з j -вої вершини. Тоді середню швидкість поширення i -вої тріщини можна подати так:

$$V_{ij} \approx x_{ij*}t_*^{-1}. \quad (3)$$

З урахуванням рівності (2) рівняння (3) запишемо у вигляді

$$V_{ij} = 2\alpha_{ij}\delta_{ij}t_*^{-1}. \quad (4)$$

Для визначення моменту елементарного акту руйнування – стрибка тріщини застосуємо класичний деформаційний критерій міцності, який запишемо у вигляді [1]

$$\varepsilon_{ij}(p) = \varepsilon_c(p, C_H^{ij}). \quad (5)$$

Тут $\varepsilon_c(p, C_H^{ij})$ – критичне значення деформацій розтягу для металу за дії воденьвмісного середовища.

На основі лінійної залежності (1), рівність (5) можна записати у такому вигляді

$$\varepsilon_{ij}(p) = \varepsilon_{c_1} - B_1 C_H^{ij}(x_{ij*}, t_*), \quad (6)$$

де ε_{c_1} – критичне значення деформацій розтягу для металу за відсутності водню; B_1 – константа, яку визначають експериментально; $C_H^{ij}(x_{ij*}, t_*)$ – концентрація водню, утворена за час t_* на віддалі x_{ij*} від вершини тріщини.

Відомо, що між величиною деформації ε_{ij} в зоні передруйнування і величиною розкриття тріщини δ_{ij} існує пропорційна залежність, то деформацію виразимо через розкриття тріщини в її вершині [1]

$$\varepsilon_{ij} = h^{-1}\delta_{ij}, \quad (7)$$

де h – коефіцієнт пропорційності.

З урахуванням залежності (7) із співвідношення (6) можна записати наступну рівність

$$1 - \delta_{ij}\delta_C^{-1} = B_2 C_H^{ij}(x_{ij*}, t_*), \quad (8)$$

де $B_2 = B_1 h \delta_C^{-1}$; δ_C – критичне значення розкриття тріщини у її вершині.

Отже задача звелася до визначення концентрації водню $C_H^{ij}(x_{ij*}, t_*)$, що утворюється за час t_* на віддалі x_{ij*} від вершини тріщини. У праці [1] розв’язано задачу дифузії водню в полі механічних напружень у вершині тріщини і отримано вирази для визначення концентрації водню

для малих і великих періодів часу. Застосовуючи метод граничної інтерполяції запропоновано формулу для визначення концентрації водню $C_H(x, t)$ на всьому діапазоні зміни часу [1]

$$C_H(x, t) = 2C_0 \sqrt{\tau} \exp\left[2m_H \xi - 0,25 \xi^2 \tau^{-1}\right] \left[\xi \sqrt{\pi} \exp(m\xi) + 2\sqrt{\tau} \exp(-0,25 \xi^2 \tau^{-1}) \right]^{-1}, \quad (9)$$

де $\tau = Dt/x_m^2$, D – коефіцієнт дифузії водню, t – час, $x_m = 2\delta$ – абсциса точки максимуму механічних напружень; $\xi = x/x_m$, x – координата, напрямлена від вершини тріщини в глибину тріщини; $m_H = V_H(\sigma_m - \sigma_0)/(2RT_0)$, R – універсальна газова стала, T_0 – абсолютна температура, V_H – парціальний молярний об'єм водню в метали, $\sigma_m = 2,4\sigma_T$, $\sigma_0 = \sigma_T/\sqrt{3}$, σ_T – границя текучості матеріалу; C_0 – концентрація водню на поверхні вершини тріщини.

Підставимо у співвідношення (8) залежності (9) і (4). Після необхідних математичних перетворень отримаємо рівняння для визначення швидкості поширення i -вої воднево-механічної тріщини

$$\frac{\alpha_{ij} \delta_{ij} V_{ij}}{D} \exp \frac{\alpha_{ij} \delta_{ij} \pi V_{ij}}{D} = \frac{2}{\pi(1 - \delta_{ij} \delta_C^{-1})^2} \exp(-2\alpha_{ij} m_H) \left[B_2 C_0^{ij} \exp(2\alpha_{ij} m_H) - 1 + \delta_{ij} \delta_C^{-1} \right]^2. \quad (10)$$

Рівняння (10) відносно швидкості росту тріщини $V_{ij} = \frac{da_{ij}}{dt}$ можна розв'язати тільки чисельно або аналітично для кожного конкретного значення параметрів $\alpha_{ij}, B_2, C_0^{ij}, m_H, D$. Однак щоб побудувати математичну модель для оцінювання залишкової довговічності пластин з системами тріщин необхідно мати аналітичне рівняння для опису росту тріщин. Тому рівняння (10) дещо спростимо. Якщо $\frac{\alpha_{ij} \delta_{ij} V_{ij}}{D} \ll 1$, то рівняння (10) можна записати у наступному вигляді

$$V_{ij} = \frac{2D}{\pi \alpha_{ij} \delta_{ij} (1 - \delta_{ij} \delta_C^{-1})^2} \exp(-2\alpha_{ij} m_H) \left[B_2 C_0^{ij} \exp(2\alpha_{ij} m_H) - 1 + \delta_{ij} \delta_C^{-1} \right]^2. \quad (11)$$

Рівняння (11) описує кінетику росту воднево-механічних тріщин. Щоб визначити період їх докритичного росту (залишковий ресурс елемента конструкцій) необхідно до рівняння (11) додати відповідні початкові і кінцеві умови процесу поширення тріщин. Початкова умова процесу локального руйнування така: в початковий момент часу (момент часу від якого починаємо розраховувати залишкову довговічність елемента конструкції) тріщина має початковий розмір, а кінцева умова – час досягання тріщини свого граничного розміру визначатиме залишкову довговічність елемента конструкції. Таким чином, до рівняння (11) додаємо наступні умови

$$t = 0, \quad l_{ij}(0) = l_{ij0}; \quad t = t_*, \quad l_{ij}(t_*) = l_{ij*}, \quad \delta_{ij}(l_{ij*}) = \delta_c, \quad t_* = \min(t_{ij}), \quad (12)$$

де l_{ij*} – критичний розмір i -ої тріщини; t_{ij} – час можливого критичного старту i -вої тріщини.

Таким чином, за відомими характеристиками матеріалу період докритичного росту воднево-механічних тріщин визначається на підставі співвідношень (11), (12).

Далі, застосуємо математичну модель (11), (12) до розв'язання задач про визначення залишкової довговічності пластин, послаблених різними типами систем тріщин, за їхнього довготривалого статичного розтягу в умовах воденьвмісного середовища.

Визначення залишкової довговічності пластини з періодичною системою воднево-механічних тріщин. Нехай нескінченна пластинка з системою періодичних прямолінійних тріщин початкової довжини $2l_0$, розміщених вздовж однієї лінії піддається розтягу у нескінченно віддалених точках рівномірно розподіленим зусиллям інтенсивності p (рис. 2). Водночас пластинка перебуває під дією воденьвмісного середовища. За дії середовища і силового чинника

тріщини в пластині розвиватимуться як воднево-механічні тріщини. Задача полягає у визначенні часу $t = t_*$, за який в результаті дії навантаження і середовища тріщини підростуть до критичного розміру $l = l_*$ і пластина зруйнується. Вважаємо, що тріщини однакового розміру l , перебувають в однакових умовах дії напружено-деформованого стану і дії водню, а зовнішні навантаження розтягу p прикладені так, що напружено-деформований стан у пластині симетричний відносно ліній розміщення тріщин. Якщо напружено-деформований стан симетричний відносно ліній розміщення тріщин, то рівняння (11) набуде такого вигляду

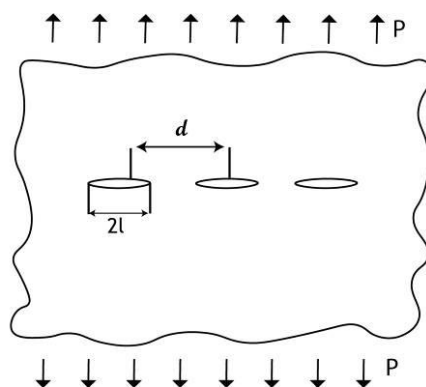


Рис. 2. Схема навантаження пластини з періодичною системою тріщин.

$$V = \frac{2D}{\pi\alpha\delta(1-\delta_t\delta_c^{-1})^2} \exp(-2\alpha m_H) \quad (13)$$

$$\left[B_2 C_0 \exp(2\alpha m_H) - 1 + \delta_t \delta_c^{-1} \right]^2.$$

Відповідно умови (13) запишемо так

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \quad \delta(t_*) = \delta_c. \quad (14)$$

Застосуємо математичні співвідношення (13), (14) для конкретної пластини, яка виготовлена зі сталі 4147. У праці [1] для сталі 4147 на основі експериментальних даних і теоретичних результатів швидкості росту одинарної воднево-механічної тріщини визначено її характеристики, що входять в рівняння (14). Вони приймають такі значення

$$\delta_c = 0,89 \cdot 10^{-4} \text{ м}; \quad m_H = 0,6528; \quad D = 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (15)$$

Величина C_0 дорівнює концентрації водню за тиску 21 МПа. Величини α і A_2 визначені на основі експериментальних даних, наведених у праці [1], застосовуючи метод найменших квадратів і рівняння (13). Підставляючи значення характеристик матеріалу (15) в рівняння (13) отримаємо

$$\frac{dl}{dt} = \frac{7,141 \cdot 10^{-7}}{\frac{\delta_t}{\delta_c} \left(1 - \frac{\delta_t}{\delta_c} \right)^2} \frac{\delta_t}{\delta_c} - 0,043 \quad (16)$$

Деформаційний параметр розкриття тріщини δ_t , що входить в рівняння (16) визначатимемо на основі результатів праць [14] у такому вигляді

$$\delta_t = \frac{K_I^2}{\sigma_t E (1 - \lambda^2)}, \quad \lambda = \frac{p}{\sigma_t}, \quad (17)$$

де K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень в вершині тріщини; p – інтенсивність рівномірно розподілених довготривалих статичних зусиль, що діють на пластину; E – модуль пружності; σ_t – усереднені напруження в зоні передруйнування.

Підставимо співвідношення (17) в рівняння (16)

$$\frac{dl}{dt} = \frac{7,141 \cdot 10^{-7} \delta_c \sigma_t E (1 - \lambda^2)}{K_I^2 \left(1 - \frac{K_I^2}{\sigma_t E \delta_c (1 - \lambda^2)} \right)^2} \frac{K_I^2}{\sigma_t E \delta_c (1 - \lambda^2)} - 0,043 \quad (18)$$

Для випадку періодичної системи тріщин в пластині коефіцієнт інтенсивності напружень визначають зі співвідношення [15]

$$K_I = p\sqrt{dtg(\pi l/d)}. \quad (19)$$

З урахуванням рівності (19) рівняння (20) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \frac{7,141 \cdot 10^{-7} \delta_c \sigma_t E (1 - \lambda^2)}{p^2 dtg(\pi l/d) \left(1 - \frac{p^2 dtg(\pi l/d)}{\sigma_t E \delta_c (1 - \lambda^2)}\right)^2} \frac{p^2 dtg(\pi l/d)}{\sigma_t E \delta_c (1 - \lambda^2)} - 0,043^2 \quad (20)$$

за початкової і кінцевої умов

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \quad \delta_{ij}(l_{ij*}) = \delta_c. \quad (21)$$

Для даного випадку критичний розмір тріщини l_* визначаємо з критерію критичного розкриття тріщини [1]

$$\delta_t(l_*) = \delta_c. \quad (22)$$

Інтегруючи рівняння (20) за початкової і кінцевої умов (21), отримаємо співвідношення для визначення залишкової довговічності $t = t_*$ пластини з періодичною системою тріщин за дії довготривалого статичного розтягу і воденьвмісного середовища

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} \frac{p^2 dtg(\pi l/d)}{p^2 dtg(\pi l/d) \left(1 - \frac{p^2 dtg(\pi l/d)}{\sigma_t E \delta_c (1 - p^2 \sigma_t^{-2})}\right)^2} \frac{p^2 dtg(\pi l/d)}{\sigma_t E \delta_c (1 - p^2 \sigma_t^{-2})} - 0,043^{-2} dl. \quad (23)$$

Реалізацію математичної задачі (23) проведемо для пластини зі сталі 4147 з такими характеристиками матеріалу і геометричними параметрами: $\sigma_t = 996$ МПа, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $d = 0,1$ м.

З рівності (22) з урахуванням співвідношень (17), (19) визначали критичну довжину тріщини. На рис. 3 за співвідношенням (23) побудовано залежність залишкової довговічності пластини зі сталі 4147 із періодичною системою тріщин від зміни навантаження p (рис. 3а) і початкового розміру тріщини (рис. 3б, крива 1, $p = 100$ МПа, $l_* = 0,048$ м). Для проведення якісного аналізу впливу систем тріщин на довговічність пластини на рис. 3б (крива 2) побудовано криву довговічності пластини з одною тріщиною.

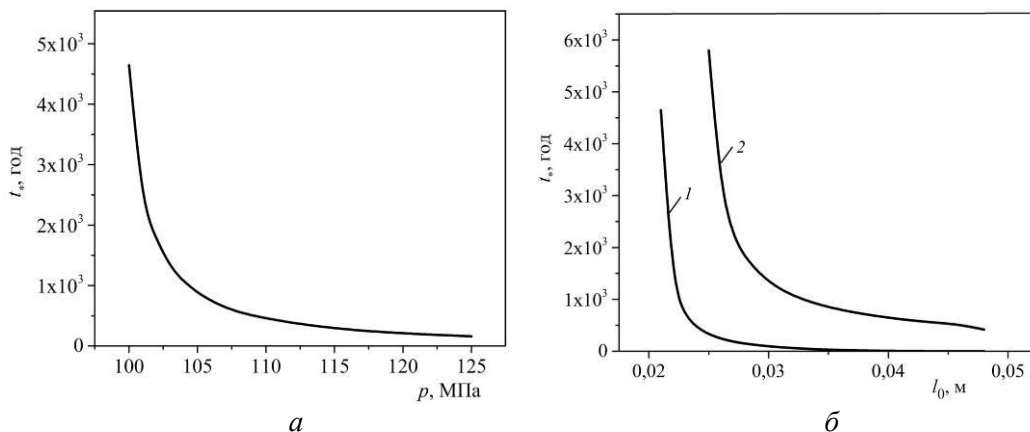


Рис. 3. Залежність залишкової довговічності пластини від зміни параметра навантаження (а) і початкового розміру тріщин (б).

Аналізуючи криві на рис. 3б бачимо, що довговічність пластини з періодичною системою тріщин менша (більше ніж на порядок) ніж довговічність пластини з однією тріщиною. В цілому незначне збільшення параметра навантаження p і початкового розміру тріщини l_0 призводять до

зменшення залишкової довговічності пластини, яка піддана довготривалому статичному розтягу в умовах воденьвмісного середовища.

Оцінка залишкової довговічності пластини, послабленої двоякоперіодичною системою воднево-механічних тріщин. Розглядається нескінченна пластина з системою двоякоперіодичних прямолінійних тріщин початкової довжини $2l_0$, центри яких розміщені у вузлах квадратної решітки із стороною d (рис. 4). Пластина на безмежності піддається дії довготривалого статичного навантаження. Вважається, що навантаження прикладені перпендикулярно до лінії розміщення тріщини, тобто в пластині виникає симетричний відносно лінії розміщення тріщин напружено-деформований стан. Водночас, пластина перебуває в умовах дії воденьвмісного середовища. За заданих умов навантаження і середовища тріщини в пластині розвиватимуться і зрештою досягнуть граничних розмірів, що призведе до її руйнування. Задача полягає у визначенні часу $t = t_*$, за який тріщини в умовах заданого навантаження досягнуть свого критичного розміру $l = l_*$. Цей час визначатиме залишкову довговічність пластини.

З урахуванням того, що напружено-деформований стан в пластині симетричний відносно лінії розміщення тріщин для розв'язання задачі застосуємо вище наведене рівняння (13). Приймаємо, що пластина виготовлена зі сталі 4147. Тоді розв'язок поставленої задачі зводиться до розв'язання математичних співвідношень (16), (21). Інтегруючи рівняння (16) за умов (21) отримаємо співвідношення для визначення залишкової довговічності пластини з системою двоякоперіодичних тріщин за дії воденьвмісного середовища і довготривалого статичного розтягу

$$t_* = 1,4 \cdot 10^6 \int_{l_0}^{l_*} \delta_t(l) \delta_c^{-1} \left(1 - \frac{\delta_t(l)}{\delta_c} \right)^2 \frac{\delta_t(l)}{\delta_c} - 0,043 \, dl. \quad (24)$$

Тут параметр розкриття тріщини визначаємо зі співвідношення (17), а коефіцієнт інтенсивності напружень $K_I(l)$ для випадку двоякоперіодичної системи тріщин у пластині на основі праці [15]

$$K_I(l) = p\sqrt{\pi l} \left(1 + \frac{3\pi\lambda_1^2}{8\sqrt{3}} - 0,0337\pi^2\lambda_1^4 + 0,0583\pi^3\lambda_1^6 + O(\lambda_1^8) \right), \quad \lambda_1 = 2ld^{-1}. \quad (25)$$

Значення критичного розміру тріщини l_* визначали із критерію (22). Для навантаження $p = 200$ МПа величина $l_* = 0,0148$ м.

За співвідношенням (24) з урахуванням (17) і (25) на рис. 5 (крива 1) побудовано залежність залишкової довговічності пластини з двоякоперіодичною системою воднево-механічних тріщин від початкового розміру тріщини. Встановлено, що наявність двоякоперіодичної системи тріщин зменшує довговічність пластини порівняно із однією тріщиною (крива 2).

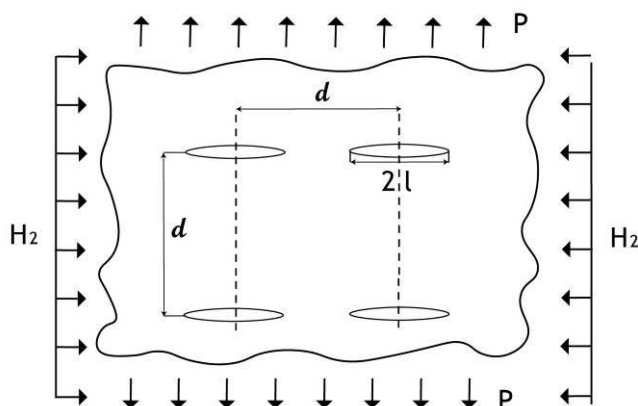


Рис. 4. Схема навантаження пластини з двоякоперіодичною системою тріщин.

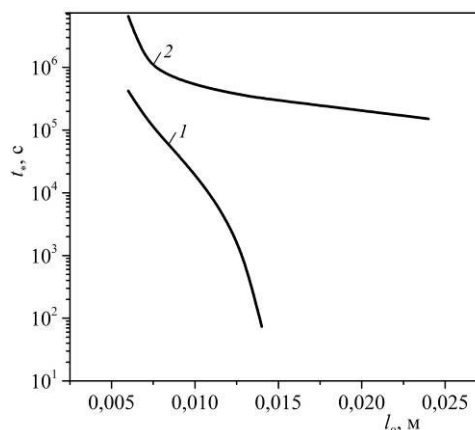


Рис. 5. Залежність залишкової довговічності пластини від початкового розміру тріщини.

Оцінка залишкової довговічності пластини, послабленої періодичною системою паралельних воднево-механічних тріщин. Розглядається нескінченна пластина з періодичною системою паралельних прямолінійних тріщин однакової початкової довжини (рис. 6), які

знаходяться на віддалі d одна від одної. Пластина знаходиться під дією розтягу на безмежності зусиллями p , напрямленими перпендикулярно до лінії розміщення тріщин. Окрім дії силового чинника, пластина контактує із воденьвмісним середовищем, яке попадає в тріщини. Сумісна дія воденьвмісного середовища і довготривалого статичного навантаження призведе до поширення системи тріщин. Розвиток останніх до їх критичного розміру може призвести до непередбачуваного руйнування пластини. Задача полягає у визначенні часу $t = t_*$, за який тріщини підростуть до критичного розміру і пройде руйнування пластини (пластина не зможе уже виконувати свої функціональні можливості).

Приймаємо, що пластина виготовлена зі сталі 4147. Тоді реалізацію поставленої задачі проведемо аналогічно до попереднього випадку на основі математичної моделі (16), (21). Для визначення параметра розкриття тріщини (17) в рівнянні (16) необхідно знати коефіцієнт інтенсивності напружень для періодичної системи паралельних тріщин однакової довжини. У праці [15] для даного випадку наведено співвідношення для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень, яке справедливе для малих і великих відстанях між тріщинами

$$K_I = p \sqrt{\frac{l}{\lambda_2} \operatorname{th}(\pi \lambda_2)} \left(1 + \frac{\pi^2 \lambda_2^2}{24 \operatorname{ch}(\pi \lambda_2)} - \frac{\pi^4 \lambda_2^4}{640 \operatorname{ch}(\pi \lambda_2)} \right), \quad \lambda_2 = 2ld^{-1}. \quad (26)$$

Розв'язавши математичну задачу (16), (21), отримаємо співвідношення для визначення залишкової довговічності пластини з періодичною системою прямолінійних воднево-механічних тріщин

$$t_* = \frac{1,4 \cdot 10^6 p^2 \delta_C^{-1} l \operatorname{th}(\pi \lambda_2)}{\sigma_t E (1 - p^2 \sigma_t^{-2})^{1/2} \lambda_2} \left(1 + \frac{\pi^2 \lambda_2^2}{24 \operatorname{ch}(\pi \lambda_2)} - \frac{\pi^4 \lambda_2^4}{640 \operatorname{ch}(\pi \lambda_2)} \right)^2 - \frac{p^2 l \lambda_2^{-1} \operatorname{th}(\pi \lambda_2) \delta_C^{-1}}{\sigma_t E (1 - p^2 \sigma_t^{-2})} \left(1 + \frac{\pi^2 \lambda_2^2}{24 \operatorname{ch}(\pi \lambda_2)} - \frac{\pi^4 \lambda_2^4}{640 \operatorname{ch}(\pi \lambda_2)} \right)^2 - \frac{p^2 l \lambda_2^{-1} \operatorname{th}(\pi \lambda_2) \delta_C^{-1}}{\sigma_t E (1 - p^2 \sigma_t^{-2})} \left(1 + \frac{\pi^2 \lambda_2^2}{24 \operatorname{ch}(\pi \lambda_2)} - \frac{\pi^4 \lambda_2^4}{640 \operatorname{ch}(\pi \lambda_2)} \right)^{-2} - 0,043 dl. \quad (27)$$

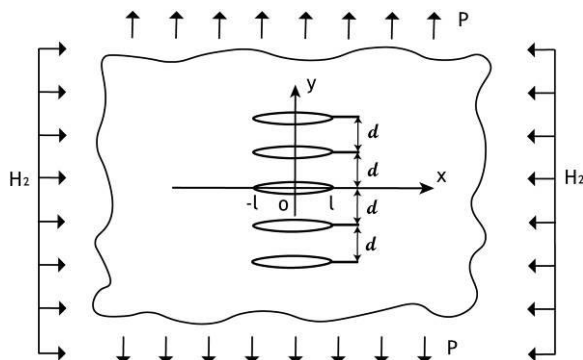


Рис. 6.

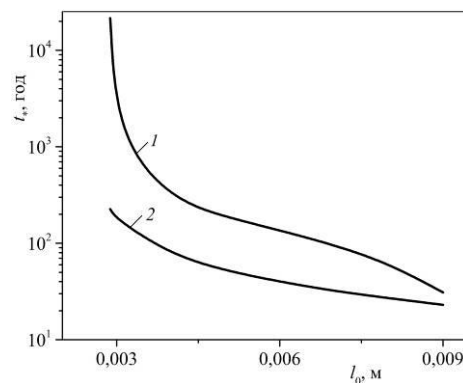


Рис. 7.

Рис. 6. Схема навантаження пластини з періодичною системою паралельних тріщин.

Рис. 7. Залежність залишкової довговічності пластини від початкового розміру тріщини: крива 1 – періодична система паралельних тріщин; крива 2 – одна наскрізна тріщина.

Чисельну апробацію співвідношення (27) проведено для конкретної пластини зі сталі 4147, механічні характеристики якої наведено вище. На рис. 7 побудовано залежності залишкової довговічності пластини з періодичною системою паралельних тріщин (крива 1) і однією тріщиною (крива 2) від початкового розміру дефекту. При цьому $d = 0,25$ м. Показано, що залишкова довговічність пластини з системою тріщин є більша ніж пластини з однією тріщиною.

Висновки

Застосовуючи раніше розроблений авторами деформаційних підхід побудовано математичну модель для дослідження кінетики розвитку систем воднево-механічних тріщин у пластинах за їх довготривалого розтягу. На основі сформульованої моделі визначено залишкову довговічність пластини зі сталі 4147 з системою періодичних тріщин, двоякоперіодичною системою та періодичною системою паралельних тріщин. Встановлено, що періодична і двоякоперіодична системи тріщин у пластині призводить до зменшення її залишкової довговічності порівняно із наявністю однієї тріщини. Водночас періодична система паралельних тріщин призводить до збільшення довговічності пластини порівняно із наявністю однієї тріщини.

Список використаних джерел

1. Андрейків О.Є., Гембара О.В. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. Київ: Наукова думка, 2008. 344 с.
2. Shuang Liang, Minsheng Huang, Lv Zhao, Yaxin Zhu, Zhenhuan Li. Effect of multiple hydrogen embrittlement mechanisms on crack propagation behavior of FCC metals: Competition vs. synergy. *International Journal of Plasticity*. 2021. Vol. 143. 103023.
3. Alexander Balitskii. Hydrogen assisted crack initiation and propagation in nickel-cobalt heat resistant superalloys. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 16. P. 134–140.
4. Alla V. Balueva, Iliia N. Dashevskiy, Jerry Magana. A New Model for Hydrogen-Induced Crack (HIC) Growth in Metal Alloy Pipelines Under Extreme Pressure. *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 28. P. 873–885.
5. Panasyuk V.V., Andreykiv O.Y., Gembara O.V. Hydrogen degradation of materials under long-term operation of technological equipment. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2000. 25(1). P. 67–74.
6. Ronevich J.A., Somerday B.P., Feng Z. Hydrogen accelerated fatigue crack growth of friction stir welded X52 steel pipe. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. 42(7). P. 4259–4268.
7. Dmytrakh I.M., Leshchak R.L., Syrotyuk A.M., Barna R.A. Effect of hydrogen concentration on fatigue crack growth behaviour in pipeline steel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. 42(9). P. 6401–6408.
8. Dmytrakh I.M., Smiyan O.D., Syrotyuk A.M., Bilyy O.L. Relationship between fatigue crack growth behaviour and local hydrogen concentration near crack tip in pipeline steel. *International Journal of Fatigue*. 2013. 50. P. 26–32.
9. Briottet L., Moro I., Escot M., Furtado J., Bortot P., Tamponi G.M., Solin J., Odemer G., Blanc C., Andrieu E. Fatigue crack initiation and growth in a CrMo steel under hydrogen pressure. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. 40(47). P. 17021–17030.
10. Toribio J., Kharin V. A hydrogen diffusion model for applications in fusion nuclear technology. *Fusion Engineering and Design*. 2000. 51– 52. P. 213–218.
11. Balueva Alla Modeling of Hydrogen Embrittlement Cracking in Pipe-lines under High Pressures. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 3. P. 1310–1315.
12. Jorge Palma Carrasco, Diego David Silva Diniz, José Maria Andrade Barbosa, Antonio Almeida Silva, Marco Antonio dos Santos. Numerical simulation of the hydrogen trapping effect on crack propagation in API 5CT P110 steel under cathodic overprotection. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, Is. 5. P. 3230–3239.
13. McMeeking R. M. Finite deformation analysis of crack tip opening in elastic-plastic materials and implications for fracture. *Journal of the Mechanics and Physics Solids*. 1977. 25(5). P. 357–381.
14. Yadzhak N. Generalization of the equivalent area method for the case of short fatigue cracks in a three-dimensional body. *Visnyk of the Lviv University. Series Mechanics and Mathematics*. 2020. № 89. С. 134–141.
15. Саврук М. П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. К.: Наук. думка, 1988. 620 с.

Рецензент: Гембара Оксана Володимирівна, доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України